

热图象场的分形测量方法研究

陈云浩 郭达志

(中国矿业大学北京校区, 北京 100083)

陶康华

(上海师范大学地理系, 上海 200234)

摘要 影像的分形研究是图象分析中的一个新课题. 该文通过对分形原理、传统的分形计算方法的研究, 结合热图象特征给出了3种不同的分维计算方法——灰度曲面分形计算, 剖面曲线分形计算, 象元点分形计算. 实践表明灰度曲面分形计算可以揭示热图象整体的分形特征; 剖面曲线分形计算则可对研究典型地域的热辐射特征; 象元点分形计算可以给出热辐射变化梯度的定量描述. 在讨论了有关分形性质后, 给出了上述方法在上海市热图象场分量测中的良好应用, 并分析了分形计算结果的物理含义.

关键词 热图象 分形几何 分维 上海

中图分类号: TP751 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2000)01-0034-05

Research on Calculation Method of Thermal Image Fractal Dimension

CHEN Yun-hao, GUO Da-zhi

(Beijing Graduate School, China University of Mining & Technology, Beijing 100083)

TAO Kang-hua

(Geography Department, STU, Shanghai 200234)

Abstract Image fractal dimension is a useful measure which can be used to characterize features of images. In this paper, three new methods——gray scale surface fractal, curve fractal, pixel fractal to estimate the fractal dimension of thermal image are proposed. The practices indicate that gray scale surface fractal can open out the unitary fractal character of thermal image, curve fractal can contrast and research the thermal radiation character of typical area and pixel fractal can give a quantitative description of variety grades of thermal radiation. After the researching of general fractal theory, the related characters of those methods are discussed. As an example, Shanghai City thermal image is given and the signification of experimental result is analyzed lastly.

Keywords Thermal image, Fractal geometry, Fractal dimension, Shanghai

0 引言

自从 Mandelbrot 在《英国的海岸线有多长》一文中提出分数维概念以后^[1], 分形几何学逐渐发展成为专门研究复杂、非规则现象的新理论, 并已被证实研究过去常被认为无规律体, 如地质体的内在

规律方面行之有效, 分形能够对自然世界和表面的复杂性作出更精确的表达.

分形几何学在地学领域得到了很好的应用, 然而在遥感资料分析方面的应用并不多见, 近年来已有学者将分形引入遥感及图形处理. 如徐青等提出了用分线方法计算 TM 数据分数维^[2], 徐建刚等研究了住宅区遥感影像的分形特征^[3], 陶闯等提出 3

种分维估计的方法^[4,5]。众所周知, 遥感数据是根据不同地物对应不同波段电磁波的响应转化为幅度获得的, 遥感图象中的同物异谱和异物同谱是困扰遥感分析的难点问题, 以上学者将分形引入遥感分析时上述问题并没有能够很好地解决。

本文所研究的对象是 TM-6 热图象, 由于影像的不同的灰度值对应地面辐射温度的高低, 因而不存在同物异谱和异物同谱的问题, 引入分形量测方法的目的是为了进一步研究热图象场本身的热力景观结构及其热辐射值的动态变化结构。

1 热图象的分形性^[2,6]

分形对于描述所有空间尺度内复杂的、不规则变化特征是一个有力工具。这种以“粗糙程度”表示的复杂性可以用分形维数定量地描述。分形体现了自相似思想, 即系统的空间变化形态与空间尺度的无关性。地形、地貌、岩石的多孔性、水系、岩石和土壤的矿化和化学性质等自然景观和现象都表现出这种性质。

由地表热平衡方程可知, 太阳辐射加热地表, 地表则通过大气湍流与近地层的显热交换和地表非大气窗口的热红外辐射向外辐射能量。由于地表本身的分形性质(包括下垫面地形形态、分布形态、热惯量性质)的差异, 导致地表热辐射值的分形性质。而热图象则记录了地表热辐射值。

设地表热辐射值的物理表面为分数布朗曲面: $Z = V_H(x, y)$, 其能量谱密度设为 $P(f, \theta)$, 于是有:

$$P_H(f, \theta) \propto f^{-\beta} \quad (1)$$

其中 $\beta = 2H + 1$ 。

又设有朗伯反射表面, 且不考虑遮挡及阴影影响, 远距离单位光源向量 $L(\cos\tau\sin\sigma, \sin\tau\sin\sigma, \cos\sigma)$ 入射后, 则图象强度为

$$I(x, y) = (p \cos\tau\sin\sigma + q \sin\tau\sin\sigma + \cos\sigma) / (p^2 + q^2 + 1)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

其中, $p = \frac{\partial}{\partial x} V_H(x, y)$; $q = \frac{\partial}{\partial y} V_H(x, y)$ 。

按泰勒级数展开

$$I(x, y) \approx \cos\sigma + p \cos\tau\sin\sigma + q \sin\tau\sin\sigma - \frac{\cos\sigma}{2}(p^2 + q^2) \quad (3)$$

当 p, q 较小时, 做傅氏变换

$$F(f, \theta) = 2\pi\sin\sigma f^{-\frac{\beta}{2}} e^{i(\theta - \frac{\pi}{2})} \times [\cos\theta\cos\tau + \sin\theta\sin\tau] \quad (4)$$

其能量谱密度 $P(f, \theta)$ 为

$$P(f, \theta) = |F(f, \theta)|^2 \propto f^{2-\beta} \quad (5)$$

对照式(1)与式(5)可以看出: 地表热辐射值的分数布朗曲面的谱密度正比于 $f^{-\beta}$, 其热图象的谱密度正比于 $f^{2-\beta}$ 。因此地表热辐射值的物理表面的分形性决定了其热图象灰度表面的分形性。正如 Zonneveld 指出的那样: 从航片上看不出地貌形态的比例尺的大小, 仅从热图象也不能分辨出对应地物的分辨率, 原因在于其分形性。

2 分形图象的数学特性及量测

2.1 分形的 FBM 描述

分形可用分数布朗运动 FBM (Fractional Brownian Motions) 来描述。FBM 是 Mandelbrot 在传统布朗运动基础上改造而成的, 对任意 $t \geq 0$ 和 $r > 0$, 增量 $B(t+r) - B(t)$ 的期望为 0, 方差为 r^{2H} 的正态分布, 有:

$$P\{|B(t+r) - B(t)| \leq x\} = (2\pi)^{-\frac{1}{2}} r^{-H} \int_{-\infty}^x \exp(-\frac{u^2}{2r^{2H}}) du \quad (6)$$

其中 $0 < H < 1$ 。

由 FBM 定义可以看出: FBM 的增量是平稳的, 且与 t 无关; 其增量在 H 参数下, 满足自仿射特征。即:

$$\{B_H(t+hr) - B_H(t)\} \approx \{h^H B_H(t+r) - B_H(t)\} \quad (7)$$

根据热图象的性质可分别从面、线、点 3 方面计算其表面分形、剖面曲线分形、象元点分形。

2.2 表面分维的计算

将影像视为三维物体, 对应任一象元的坐标为 $[x, y, f(x, y)]$, 其中 x, y 为象元在图象平面内的位置坐标, $f(x, y)$ 是该象点的在度值。量测其表面分维数有以下几种方法。

2.2.1 基于分数布朗表面统计性质的计算方法

对于影像灰度表面可用分形布朗随机场来表达。该随机场的一、二阶统计距与自相似参数 H 的关系为

$$\frac{E}{\|\Delta l\|^H} |G(t + \Delta t) - G(t)| = \frac{1}{N} \sum_{S(r)} |G(i, j) - G(i+k, j+l)| = C_1 r^H \quad (8)$$

式中 $G(t)$ 为影像灰度, $S(r)$ 为 (i, j) 的圆环邻域, N 为 S 内象总数对上式分别取对数, 取不同 r 值, 可回归直线斜率 H 。分维 $D = 3 - H$ 。

2.2.2 计盒法计算分维值

设影像灰度表面 $F = \{(x_i, y_j, G(x_i, y_j)) | (x_i, y_j) \in G, i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J\}$. 在影像中置边长为 r 的立方体盒子, 统计落入盒子中的象元数 $m(r)$ 和包容 $m(r)$ 个象元的盒子数 $N_{m(r)}$. 计算边长为 r 时盒子包容 $m(r)$ 个象元的概率 $P(m, r) = N_{m(r)} / M$, 其中 M 为影像总的象元数. 则覆盖整个影像所需的盒子数 $N_b(r)$ 为

$$N_b(r) = \frac{1}{m} \sum_{m=1}^M MP(m, r) \propto r^{-D} \quad (9)$$

盒子平均包容的象元点数 $M_b(r)$ 为

$$M_b(r) = \sum_{m=1}^M mP(m, r) \propto r^D \quad (10)$$

根据上两式取不同 r 值, 求出相应的 $N_b(r)$ 、 $M_b(r)$, 则可回归 D .

另外, 日本学者中山在研究点象卫星图象时, 提出了一种计算盒子数法: 对 F 分割后, 小区域所对应的空间盒子数为

$$N_{ij}(r) = \frac{1}{r} (\max_{(x_i, y_j) \in S^r} \{G(x_i, y_j)\} - \min_{(x_i, y_j) \in S^r} \{G(x_i, y_j)\} + 1) \quad (11)$$

以间距 r 分割所对应的总盒子数为

$$N = \sum_i \sum_j N_{ij}(r) \quad (12)$$

2.2.3 利用表面积与体积分形关系计算

对于影像灰度表面 $F = \{(x_i, y_j, G(x_i, y_j)) | (x_i, y_j) \in G\}$, 用正方形网格覆盖 G , 将 G 分成 $n(r) \times n(r)$ 个边长为 r 的小正方形, 在 r 较小的情况下, 有 F 的面积等于 A .

$$A = \sum_{j=1}^{n^2(r)} S_j \propto n^2(r) r^2 \quad \Rightarrow A \propto r^{2-D} \quad (13)$$

$$n^2(r) \propto \frac{1}{r^D}$$

根据线性回归原理, 有:

$$D = 2 - \frac{M \sum_{i=1}^M |(\log r_i)(\log A(r_i)) - \left| \sum_{i=1}^M \log r_i \right| \left| \sum_{i=1}^M \log A(r_i) \right| |}{M \sum_{i=1}^M (\log r_i)^2 - \left| \sum_{i=1}^M \log r_i \right|^2} \quad (14)$$

利用上式即可得到灰度表面的分维数. 本文在计算上海市热图象灰度表面分维数时使用计盒法.

2.3 剖面线分形计算

在研究城市热场时, 针对某一剖面进行典型分析是十分重要的手段. 如对上海市进行南北向, 东西

做剖面, 目的在于研究其热场方向性结构、对比城乡差异, 亦可沿黄浦江剖分, 目的在于了解水体对热效应的影响. 对固定剖面进行对比是研究热场随时间的演变、发展的很好手段. 对于曲线的分维量测一般采用尺度变换法. 选择大小不同的正方形格网去近似分维图形. 用边长为 R 的正方形网叠在曲线之上, 计算包含曲线的网格总数 N . 不断改变 R 的尺寸, 可得到一组 N . 满足下式:

$$\log N = C_0 - D \times \log R \quad (15)$$

式中 N 为不同 R 对应的方格数, R 为不同的步长, C_0 为常数, D 为分维数.

本文以灰度值 (0~ 255) 为值域, 步长单位选为象元, 构造不同的步长. 其计算步骤如图 1 所示:

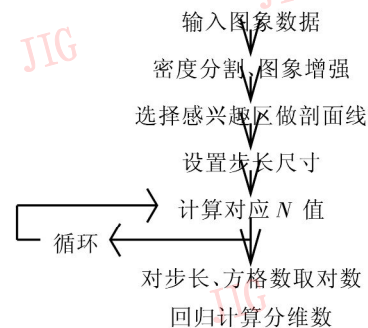


图 1 图象分维数计算流程图

2.4 点分形计算

遥感图象处理中处理的是图象栅格数据, 因而需要获得每个象点的分维值, 才能对图象的结构信息、纹理信息做深入和定量分析, 采用象元点的相邻象元灰度变化来求该点的分维.

如图 2 所示, 以任一象点 (x_0, y_0) 为中心, 按给定尺码 L 截取有效计算范围 $[0, L]$. 可分别计算基分维数. 任取 $r \in (0, L)$ 值, 令 $r = r_2 - r_1$.

$$\text{令 } n(r) = \frac{|f(r_2) - f(r_1)|}{r}$$

$$\text{则 } N(r) = \sum_{r_1=0}^{L-r_2} n(r) \frac{1}{L - r + 1} L$$

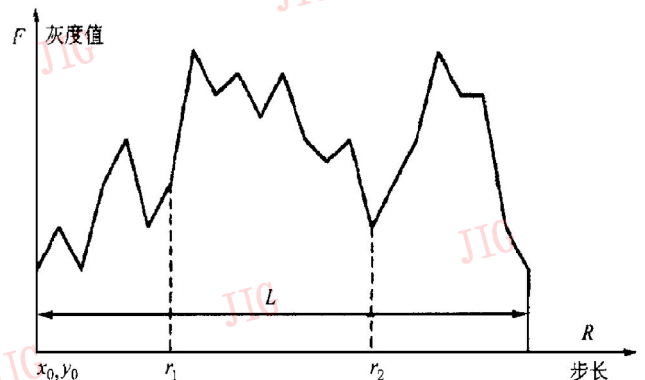


图 2 象元灰度示意图

取不同 r 值, 可得一组 $N(r)$ 值, 即可回归 $\log N(r)$ 与 $-\log(r)$ 之间的斜率, 即为 (x_0, y_0) 沿该方向分维值, 由于图象为一般矩形栅格数据, 因而可分别沿东西、南北、东南西北和东北西南方向计算 (x_0, y_0) 的方向分维, 记为 $D_{ew}, D_{sn}, D_{es}, D_{ws}$. 因而 (x_0, y_0) 的点分维向量 $D\{D_{ew}, D_{sn}, D_{es}, D_{ws}\}$. 为简单起见亦可作 4 个方向分维数的平均值作为点的分维数 $D(D_{ew} + D_{sn} + D_{es} + D_{ws}) / 4$.

对于不同的影像灰度曲面, 计算其点分维的度量尺码 L 也应有不同的选择, 加之热图象本身的象元分辨率的大小不同, 以及所研究对象要求的尺寸不同, 所以 L 的大小应视具体情况反复测验而定.

3 上海市热图象场的初步分形计算

3.1 上海市热图象场分形计算实例

本文以 TM6 上海幅为例, 说明本文提出的计盒子法灰度曲面的分维计算、典型剖面线分维计算、象元点分维数计算、以及图象分维在热图象分析中的进一步应用.

研究区域如图 3 所示, 沿城市西北东南方向剖面(I-I 方向), 其剖面灰度值曲线如图 4 所示. 在 ER mapper 平台上, 用 VC++ 编程实现了本文介绍的关于热图象的灰度曲面、剖面灰度曲线、及点分维计算算法. 并利用上述算法分别对 1990、1995、1998 年 TM6 上海幅影像计算其灰度曲面、剖面曲线、象元点的分维值.

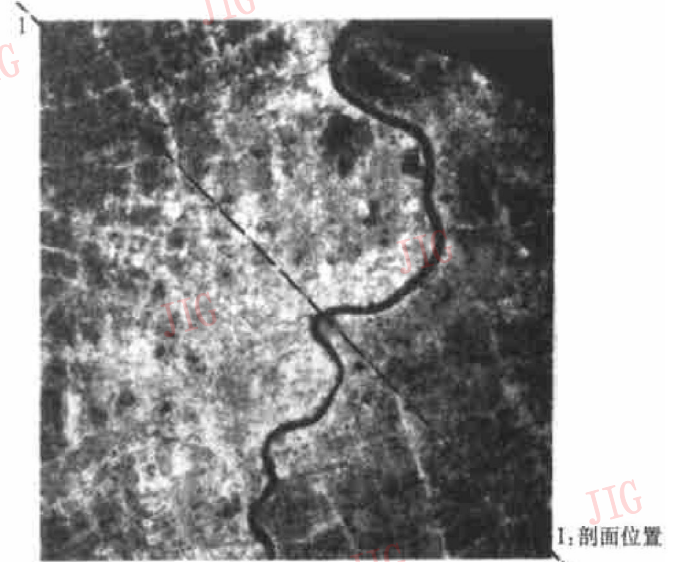


图 3 上海市 TM6 波段灰度图象 (1998 年)

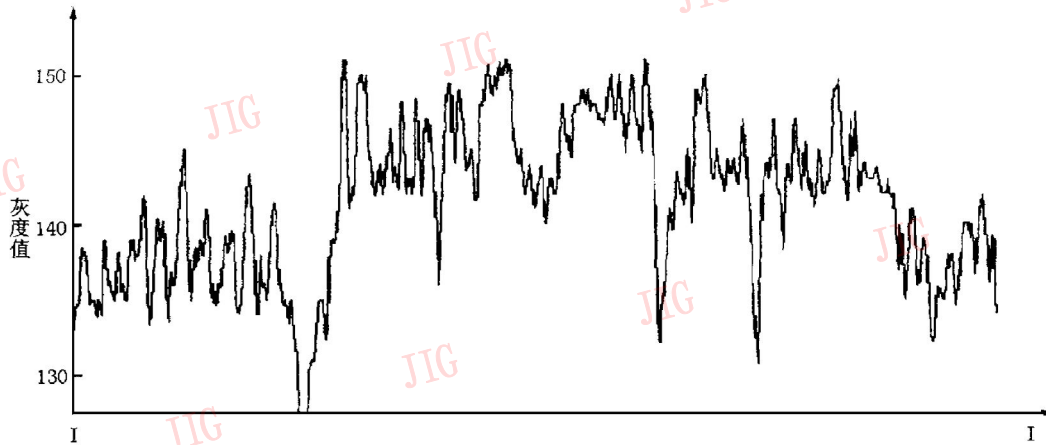


图 4 剖面灰度值曲线

3.2 对热图象分维计算结果的分析

表 1 热图象分维计算结果

时间	1990-08	1995-07	1998-08
灰度曲面分形	2.37	2.28	2.27
剖面曲线分形	1.32	1.25	1.28

计算结果如表 1 所示, 可以看出: 灰度曲面分形以 1990 年最大, 1995 年与 1998 年很接近, 表明从 1990 年至 1995 年、1998 年城乡热辐射值差异有变

缓趋势. 具体表现在: ① 城区范围进一步扩大, 使得高温辐射范围扩大. ② 城区内部热辐射值趋于平衡, 高温区之间差值减小.

剖面曲线分形的计算结果可用于对典型地域热辐射值进行分析, 对比寻找其在时间维上的演变过程. 如图 3 所示剖面线经过市区和郊区, 计算结果表明城乡的热辐射值之间的差异在 1990 年表现最明显, 到 1995 年差异缩小到最小, 而 1998 年又有扩大的趋势.

象元点分形计算的特点在于可以得到整个图象

象元的分维值. 对图象点分形计算结果进行分析, 可以发现热图象存在两个热辐射值突变带: ① 城乡结合部. ② 城区热辐射中心的边缘. 综合 1990 年、1995 年、1998 年热图象的点分形计算结果可以看出上海城市扩展及热辐射中心演变的过程. 对图象点分维做进一步处理, 可以清楚地分出上海市城乡热辐射场及城区内部变化的热力景观结构特征.

4 结束语

热图象本身的成像机理, 决定了其具有分形性. 分形几何学可对其影像的整体、局部、微观结构提供一个准确的描述工具. 分形作为一种具有尺度不变性的粗糙度度量参数, 与方差、熵等度量参数具有同等重要的统计意义. 在热图象分析中应用分维进行描述, 可以得出许多用传统方法难以得到的结果, 尤其在分析热场动态演变以及热场的内部热力景观结构方面更显优势.

如能将城市建筑形态粗糙度、建筑容积率、人口密度、能耗、绿化等因素和热辐射场分形计算进行综合研究, 相信能够进一步挖掘出热辐射场分形的深刻的物理意义.



郭达志 中国矿业大学教授, 博士生导师, 政府特殊津贴获得者. 国家矿山测量重点学科带头人, 中国测绘学会理事、中国 GIS 协会理事. 主要研究方向为遥感与地理信息系统、测绘自动化、资源环境保护. 获省部级科技奖 7 项, 出版著作 6 部, 在国内外期刊上发表论文约 110 篇.



陈云浩 中国矿业大学北京校区博士生. 主要研究方向为遥感与 GIS 及其应用. 曾在《测绘学报》等期刊上发表论文十余篇.



陶康华 上海师范大学城市信息研究中心主任, 环境科学学科带头人, GIS 专业指导教师. 主要研究方向为城市遥感、环境生态、信息工程. 获省部级科技奖 4 项.

参考文献

- 1 Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 1967, 156 (3775): 636~ 638.
- 2 徐青, 谭光国, 李翠华等. 遥感数据的分形测量. *遥感学报*, 1998, 2(3): 186~ 191.
- 3 徐建刚, 韩雪培. 城市住宅区遥感影像的分形特征研究. *遥感信息*, 1996, (2): 6~ 8.
- 4 陶闯. 基于分形的图象场表达与图象处理应用. *测绘学报*, 1994, 23(2): 107~ 112.
- 5 陶闯, 林宗坚. 影像分维估计方法的研究. *测绘学报*, 1993, 22 (2): 178~ 184.
- 6 Jaggi S, Quattroch D A, Lam N S-N. Implementation and operation of three fractal measurement algorithms for analysis of remote sensing data. *Computers & Geosciences*, 1993, 19(6): 745~ 767.
- 7 王桥, 吴纪桃. 基于地学图形数据的地表分维计算方法研究. *中国图象图形学报*, 1997, 2(4): 220~ 224.